مجلّه‌ی جغرافیا و توسعه‌ی ناحیه‌ای، شماره‌ی یازدهم، پاییز و زمستان۱۳۸۷

محمدخانه باد(نویسنده اصلی)
دکتر رضا موسوی حرمی
دکتر اسدالله محبوبی

عوامل کنترل کننده هوازدگی حفره ای (تافونی) در گرانیت های جنوب مشهد و سازند شمشک واقع در بخش شمالی بینالود

چکیده

مهمترین سیمای هوازدگی در توده های گرانیتی، هوازدگی حفره ای است که به آن تافونی می‌گویند. تافونی ها حفرات عمیق و توخالی‌اند که توسط سازوکارهای متفاوت هوازدگی به وجود می آیند. در این نوشتار، چگونگی پیدایش تافونی ها و عوامل کنترل کننده آنها در گرانیت‌های جنوب مشهد و ماسه سنگ‌های سازند شمشک در یک آب و هوای نیمه خشک بررسی شده است. براساس مطالعات پتروگرافی، این سنگ‌ها متشکّل از کوارتز ، فلدسپات پتاسیم، پلاژیوکلاز و میکا هستند. در ناحیه‌ی مورد مطالعه ، تافونی‌ها بیشتر به وسیله فرایند های فیزیکی و شیمیایی تشکیل شده اند. در این سنگ‌ها ، تافونی ها به وسیله عوامل کانی شناسی و ساختاری سنگ ، تغییرات آب و هوای محلی اطراف تافونی ها و میکروکلیمای درون خود حفرات کنترل می شوند. به دلیل فابریک (بافت) دانه ای در گرانیت‌ها ، یکی از مهمترین فرایندهای ایجاد کننده هوازدگی حفره ای ، فروپاشی دانه ای کانی های ناپایدار مانند فلدسپات‌ها و میکاهاست. آنالیز خاک‌های تولید شده در زیر گل‌سنگ‌های روی صخره های گرانیتی توسط XRD وجود کوارتز، اورتوکلاز، آلبیت، کلسیت و کانی های رسی (به ترتیب فراوانی شامل کائولینیت ، ایلیت و مونتموریونیت) را به اثبات رسانده است. سیستم‌های درزه ، رگه های پگماتیتی ، تورّق سطحی ، سست شدن و سخت شدن رویه‌ی رخنمون های سنگی از عوامل مهم کنترل کننده شروع تشکیل تافونی ها و رشد آنها محسوب می شود. بنابراین پیشنهاد می شود که لیتولوژی و ساخت سنگ و نیز تغییرات محیطی از عوامل مهم کنترل کننده هوازدگی حفره ای

تاریخ دریافت: ۸۷/۸/۱۱ تاریخ تصویب:۸۷/۱۰/۸

در این سنگ‌ها باشد. در سازند شمشک نیز انحلال سیمان آهکی و هوازدگی نمکی نقش بسیار مهمّی در تشکیل تافونی‌ها ایفا می نماید.

کلّید واژه‌ها: تافونی ، هوازدگی حفره ای ، مشهد ، فروپاشی دانه ای ، گرانیت ، هوازدگی نمکی

درآمد:

برای اولین بار ایتالیایی ها حفرات بزرگ[1] در سنگ‌های هوازده شده را ، تافونی[2] نامیدند که مفرد آن تافون[3] است. تافونی ها حفرات عمیق و یا توخالی هستند که در اثر هوازدگی حفره ای[4] در رخنمون‌های سنگی و قطعات بزرگ سنگ ایجاد می شوند. تافونی ها اغلب به صورت گروهی تشکیل می شوند و قطر و عمق هر یک از حفرات از چندین سانتی‌متر تا چندین متر درتغییر است(Viles, 2001).

تافونی ها با اشکال فرسایشی محدّبی شکل[5] در بیشتر نواحی از جمله استوایی تا جنب استوایی ، مرطوب ساحلی ، خشک و نیمه خشک و حتی در مریخ مشاهده شده است(Cooke et al., 1993).

علی رغم پراکندگی وسیع تافونی ها ، پیدایش آنها عمدتاً وابسته به نوع سنگ و آب و هوا می باشد. محققین زیادی معتقدند که تافونی ها اغلب در سنگ‌های سیلیکاته دانه متوسط تا درشت با فابریک دانه‌ای[6] و به ویژه در گرانیت‌ها ، گرانودیوریت‌ها ، گنایس‌ها و ماسه سنگ‌ها تشکیل شده اند (Matsukura & Tanaka,2000, Mellor et al. 1997, Conca and Rossman, 1985, Smith,1978). علاوه بر این تافونی ها در توف‌های ولکانیکی با تخلخل بالا نیز گزارش شده است (McBride and Picard, 2000).

در مورد چگونگی تشکیل تافونی ها مطالعات زیادی صورت نگرفته است. این پدیده در مصر ، استرالیا ، شیلی و نواحی کویری گزارش شده که عموماً توصیفی بوده و کمتر به سازوکار تشکیل آنها اشاره کرده اند (Mustoe, 1982, 1983).

1. large pits.
2. tafoni.
3. tafone.
4.cavernous weathering.
5. concave erosional features.
6. granular fabric.

قبلاً ژئومورفولوژیست‌ها تشکیل تافونی ها را به فرسایش بادی[1] نسبت می دادند که بر اثر ضربات برخورد ماسه ها[2] ایجاد می شوند. در نواحی سرد قطبی این حفرات در اثر برخورد یخ[3] تشکیل شده اند .

بلاک ولدر[4] (1929) هوازدگی های حفره ای را نتیجه‌ی واکنش‌های آب گیری[5] می داند که منجر به فروپاشی کانی هایی نظیر فلدسپات می شود. وی معتقد است که هوازدگی حفره ای در اثر نفوذ رطوبت به داخل رخنمون های سنگی حاصل می شود. هوازدگی بدین شکل در فرورفتگی‌های خفیف ودر طول شکاف‌های ریز و در زون‌های متخلخل متمرکز می شود. رطوبت سطحی ، تورّق سطحی را ایجاد می نماید و در نتیجه ذرّات رها شده ، مجدّداً به وسیله‌ی باد ، باران و غیره منتقل می‌شوند. برخی پژوهشگران نیز پیدایش این حفرات را به هوازدگی نمکی[6] منسوب کرده‌اند (Cooke & Smalley, 1968).

در اثر هوازدگی نمکی ، تبلور نمک در فضاهای خالی سنگ ، آبگیری نمک‌ها و انبساط حرارتی نمک‌ها باعث فروپاشی سنگ می شود. عقیده بر این است که متبلور شدن نمک و تغییرات حجم ایجاد شده در اثر آبگیری آنها منجر به انهدام سنگ می شود (Smith et al., 1994). بیشتر شروع تشکیل این حفرات در راستای سطوح ضعف سنگ‌ها مانند درزه ها ، شکستگی ها و غیره است (Dragovich, 1969).

در این بررسی، چگونگی پیدایش تافونی‌ها و عوامل کنترل کننده آنها در گرانیت های جنوب مشهد و ماسه سنگ‌های سازند شمشک، واقع در بخش شمالی بینالود، بررسی شده است (شکل ۱).

روش مطالعه

با توجه به اهداف مورد نظر این پژوهش، ابتدا مطالعات صحرایی برای تشخیص تافونی ها و شکل آنها و نیز نمونه برداری از این سنگ‌ها جهت تهیه‌ی مقاطع نازک صورت گرفته است. در مطالعات صحرایی سعی شده است که چگونگی شروع وتوسعه‌ی این حفرات تا حدّ امکان بررسی شود. در مطالعات

1. wind erosion.
2. sand blasting.
3. snow blasting.
4. blackwelder.
5. hydration.
6. salt weathering.

آزمایشگاهی، کانی شناسی این سنگ‌ها و ارتباط آنها با این پدیده‌ی ژئومورفولوژی مورد بررسی قرار گرفته است.

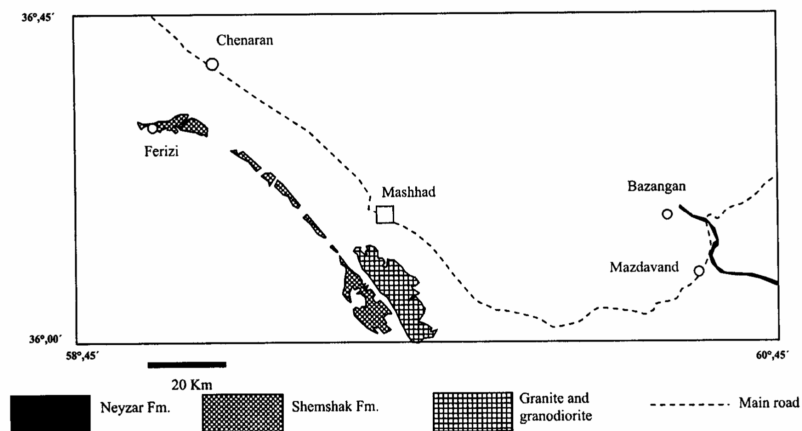
در برخی از سطوح سنگی، گل‌سنگ‌ها[1] تشکیل شده اند، که نقش بسیار مهمّی در فرسایش سنگ و تشکیل خاک دارند. به همین دلیل برای تشخیص کانی ها از روش آنالیز XRDاستفاده شده است. در این روش دو نوع آنالیز صورت گرفته است، یکی برای تشخیص ترکیب کلّی و دیگری برای تشخیص نوع کانی های رسی حاصل از هوازدگی این سنگ‌ها، که برای این منظور شش نمونه از خاک‌های تشکیل شده در زیر گل‌سنگ‌هایی که روی گرانیت ها رشد کرده اند و نیز خاک های موجود در حفرات سنگی سازند شمشک پس از عبور از غربال ۴ فی برای آنالیز آماده سازی شده است. برای رسیدن به یک نتیجه‌ی مطلوب، حذف آهک یا کربن توسط استات سدیم با PH=5، حذف موادّ آلی توسط آب اکسیژنه و حذف آهن توسط بافر سیترات با PH=7.3 و نمک طعام اشباع شده طیّ مراحل خاصّی صورت گرفته است. برای اثبات درستی آنالیزها، هر یک از آنها طی مراحل اشباع با K، $K\text{-}T550^{oC}$، اشباع با Mg و Mgاشباع با گلیسرول ، تست شده و گراف تهیه شده است. هدف از انجام این تحقیق بررسی تافونی ها و عوامل مؤثّر در تشکیل آنها واقع در گرانیت‌های جنوب مشهد و ماسه سنگ‌های سازند شمشک (بخش شمالی بینالود) می باشد.

هوازدگی حفره ای در گرانیت های جنوب مشهد

گرانیت‌های مشهد از جنوب شرق تا شمال غرب رخنمون داشته و در داخل مجموعه دگرگونی ایالت ساختاری بینالود قرار دارند (شکل ۱).

در این ناحیه گرانیت‌های درشت بلور بیشتر توسط درزه های اورتوگونال قطع شده و رگه های پگماتیتی و زینولیت‌ها در این توده های سنگی مشاهده می شوند. مهمترین و زیباترین پدیده‌ی ژئومورفولوژی در این ناحیه تافونی هاست که سازوکار و فرایند تشکیل آنها تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته است (شکلهای ۲ و ۳).

1. lichen.



شکل ۱. نقشه خلاصه شده زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (اقتباس از علوی، ۱۹۹۱).



شکل ۲. نمایی کلّی از هوازدگی های حفره ای در گرانیت های
روستای ده غیبی –جنوب مشهد



شکل ۳ –نمایی از تافونی های موجود در گرانیت های جنب کارخانه کمپوست – جنوب مشهد

مورفولوژی تافونی ها در گرانیت های جنوب مشهد

به طور کلّی انواع اشکال تافونی در گرانیت ها (Tschang, 1966) عبارت‌اند از:

۱. تافونی های دامنه ای[۱] (شکل ۴).

۲. این اشکال روی دامنه های گرانیتی مشاهده می شوند. بیشتر گلابی شکل[۲] ، تخم مرغی شکل[۳] ، هلالی شکل[۴] ، شبیه گلبرگ[5] و یا به صورت اشکال نامنظّم دیگر دیده می شوند.

۳. تافونی های قاعده ای[۶] (شکل ۴).

---

1. side tafoni.
2. pear-shape.
3. oval-shape.
4. crescent-shape.
5. flower-petals.
6. basal tafoni.

۴. بیشتر به صورت محدّب[1] و به شکل نیمه کروی[2] هستند و معمولاً از تافونی های دامنه ای بزرگترانـد و در سطوح پایین[3] دیده می شوند.

۵. تافونی های شاخی[4] (شکل ۴).

۶. پراکندگی عمودی آنها از اشکال تافونی قاعده ای وسیع تر است.

۷. تافونی های دروغین[5] (شکل ۴).

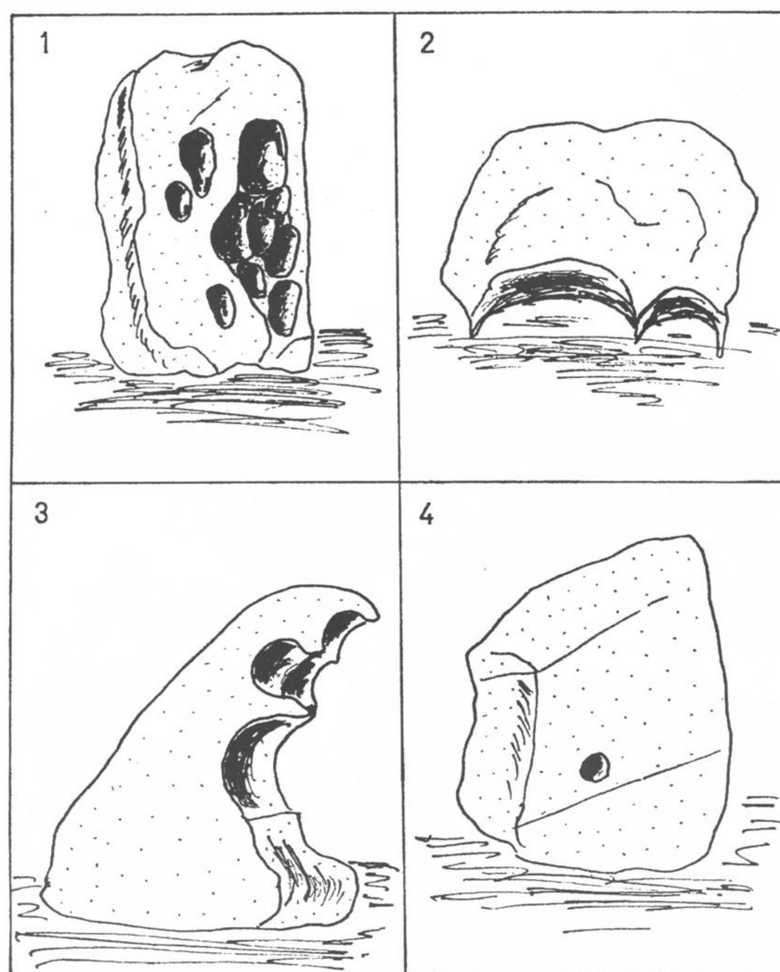
اشکال دروغین تافونی به صورت نیمه کروی بوده و اغلب به صورت منفرد دیده می شوند، کـه توسـط انحلال و فرسایش زینولیت ها ایجاد می شوند. زینولیت هایی کـه از لحـاظ مقاومـت ، ضـعیف تـر از تـوده اصلی گرانیتی است به تدریج از تـوده اصـلی بـر اثـر فرسـایش حـذف شـده و محـل خـالی شـده ، مکـانی آغازین برای تشکیل تافونی است. تافونی ها اغلـب بـه صـورت گروهـی دیـده مـی شـوند، امـا ایـن نـوع از تافونی‌ها همیشه به صورت تنها یافت می شوند.

انواع مختلف این اشکال تافونی در گرانیت‌های جنوب مشهد در شکل ۵ آورده شده است.

برای تعیین شکل تافونی ها ، پهنـا[6] ، ارتفـاع[7] و عمـق[8] تعـداد زیـادی از حفـرات در بلـوکی خاصّـی بـه صورت منظّم اندازه گیری شده اند.

بر اساس این اندازه گیری ها به طور میانگین $W >> H > D$ بوده وحفـرات بیـشتر بـه صـورت بیـضوی شکل[9] هستند. درون حفره نسبت به خارج آن دارای رنگ روشن تر و از نظر بافتی ، زبرتر است.

1. concave.
2. semispherical.
3. low level.
4. horn tafoni.
5. pseudotafoni.
6. width
7. height.
8. depth.
9. elliptical.



شکل ۴. انواع اصلی تافونی ها از نظر شکل

1. side tafoni 2. basal tafoni 3. horn tafoni 4. pseudotafoni



a) Side tafoni; **b)** Basal tafoni; **c)** Horn tafoni; **d)** Pseudotafoni

شکل ۵. اشکال مختلف تافونی در گرانیت های جنوب مشهد

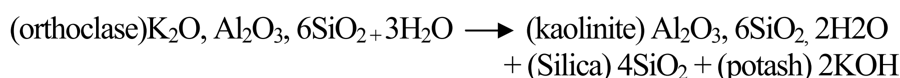
سازوکار تشکیل تافونی ها در گرانیت های جنوب مشهد

به طور کلّی هوازدگی حفره ای در سنگ‌های آذرین به ویژه گرانیت‌های جنوب مشهد، براثر فرایندهای متعدّدی تشکیل شده اند که در زیر مورد بحث و بررسی قرار می گیرند.

• هوازدگی شیمیایی[1]

گرانیت‌های محدوده‌ی مورد مطالعه در نمونه‌ی دستی دارای رنگ روشن بوده و بافت گرانولار آن به خوبی نمایان است. بر اساس مطالعات پتروگرافی، این سنگ‌ها اغلب از کوارتز، آلکالی فلدسپات، پلاژیوکلاز، مسکویت و بیوتیت تشکیل شده اند.

به طور کلّی، گرانیت در اثر رطوبت و هوازدگی تشکیل رگولیت[2] را می دهد. موادّ تولید شده به وسیله هوازدگی سنگ‌های دانه درشت و به طور خاص گرانیت‌ها، معمولاً به ساپرولیت‌های گرانیت[3]ی معروف هستند (Sequeira Braga et al., 2002). میزان هوازدگی در این سنگ‌ها تحت تأثیر ساختار سنگ، شکستگی ها، ترکیب کانی شناسی، اندازه بلور و ترکیب آب نفوذ کننده[4] است (Campbell, 1997). همان گونه که ذکر شد این سنگ‌ها دارای کانی‌های ناپایدار فلدسپات و میکا هستند که تحت تأثیر فرایندهای مختلف شیمیایی به کانی‌های رسی تبدیل می‌شوند (Huang et al., 1996, Wang, 1992, Li, 1987).



1. feldspar ⟶ Sericite ----- hydromica ----- kaolinite
2. biotite ⟶ vermiculite ----- montmorillonite ----- kaolinite

هوازدگی گرانیت ها شامل تجزیه‌ی فلدسپات و میکاها به وسیله‌ی آب است. به طور مثال اورتوکلاز می تواند براساس واکنش زیر به کائولنیت تبدیل شود (شکل۶).

$$(orthoclase)K_2O, Al_2O_3, 6SiO_2 + 3H_2O \longrightarrow (kaolinite)\ Al_2O_3, 6SiO_2, 2H2O + (Silica)\ 4SiO_2 + (potash)\ 2KOH$$

پتاس و سیلیکا به وسیله‌ی این واکنش توسط فرایند آب‌شویی[5] از متن سنگ خارج می شوند. دراین حالت در نقاطی که رطوبت در آن جمع می شود، حفره ای در حال تشکیل شدن است.

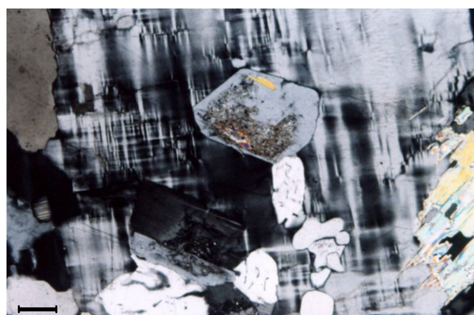
1. chemical weathering.
2. regolith.
3. granitic saprolite .
4. penetrating water.
5. leaching.

برای بررسی این فرآیندها نمونه های خاک تشکیل شده در سطح گرانیت، که در زیر گل‌سنگ‌ها قرار داشته است، انتخاب و توسط دستگاه پراش اشعه‌ی ایکس (XRD) آنالیز شده است . کانی‌های رسی شناسایی شده به ترتیب فراوانی شامل کائولینیت ، ایلیت ، مونتموریونیت ، و مقدار بسیار کمی کلریت است (شکل ۷).

پروفیل های هوازده گرانیتی ، بیشتر حاوی کائولینیت هستند. همان گونه که در مقاطع میکروسکپی این سنگ‌ها مشاهده می شود ، بیشتر کانی‌های ناپایدار تحت تأثیر دگرسانی شدید قرار گرفته اند. در نتیجه یکی از فرایندهای مؤثّر در تشکیل این هوازدگی‌های حفره ای ، فروپاشی کانی‌های ناپایدار است. کانی‌های فلدسپات و میکا ابتدا کمی دگرسان شده و با افزایش هوازدگی ، ساختار اوّلیّه‌ی کانی‌ها از بین رفته و به مرور زمان ، به کانی‌های رسی تبدیل می شوند. این کانی‌های رسی خود نیز در تلاشی سنگ کمک می نمایند.

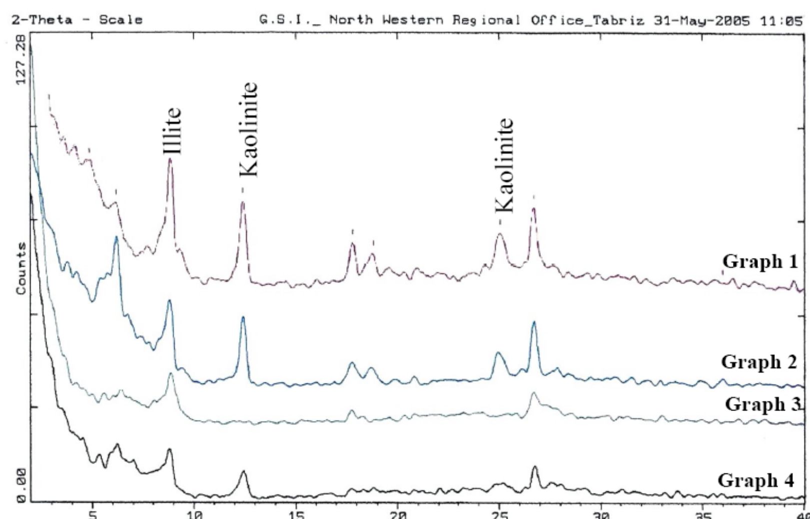
سست شدن هسته و سخت شدن رویه[1]

این پدیده ها شامل یک فرایند زمین شناسی است که در اثر آن قسمت خارجی سنگ نسبت به قسمت درونی آن سخت می شود، در نتیجه هوازدگی قسمت خارجی آن کاهش می یابد. فرایند سست شدن هسته و سخت شدن رویه‌ی سنگ اغلب در بیشتر نواحی دنیا و به طور خاص در نواحی خشک و نیمه خشک گزارش شده اند (Conca & Rossman, 1982).



شکل ۶ . دگرسانی فلدسپاتها به سرسیت و کائولینیت – XPL

1. core softening & case hardening.



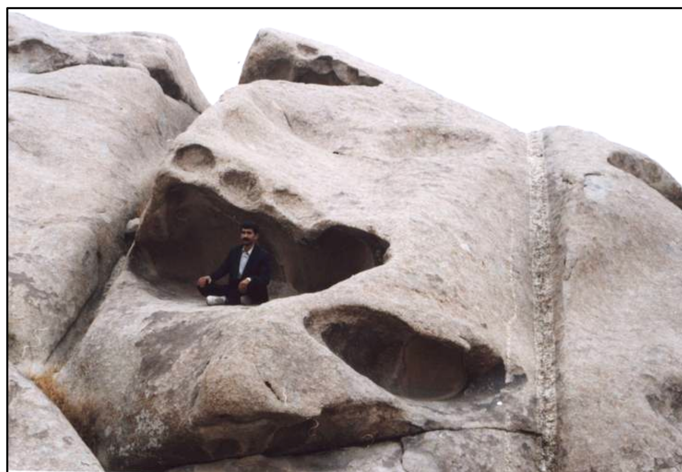
شکل ۷. گراف XRD نمونه خاک ایجاد شده از هوازدگی گرانیت های جنوب مشهد

Graph 1: Ion exchange (Mg saturation with glycerol), Graph 2: Ion exchange (with Mg saturation), Graph 3: Heat treatment on 550^{oc}, Graph 4: Ion exchange (with K saturation)

این سخت شدن رویه‌ی سنگ گاهی اوقات induration نامیده می شود و مترادف پوسته سخت[۱] نیز به کار می رود (Dorn, 2004). اغلب تافونی ها از مناطقی در سطح سنگ شروع می شوند که هوازدگی متفاوتی را نشان داده و این مناطق شامل تغییرات در لیتولوژی، ساختار، ترکیب و بافت است. مراحل مختلف توسعه و تکامل تافونی ها در مطالعات صحرایی به صورت آشکار دیده می‌شوند. تحت شرایط خاص آب و هوایی، سطح سنگ پس از هر بارندگی بلافاصله خشک می شود، در حالی که رطوبت سطوح داخلی به مدّت زیادتری در سنگ باقی می ماند. در این شرایط سطح بیرونی سخت شده[۲]، در حالی که قسمت‌های درونی آن ضعیف تر و سست تر[۳] می شود. پس از مدّتی گودی‌هایی در سنگ

1. duricrust.
2. case hardening.
3. core softening.

ایجاد می شود، به گونه ای که شرایط رطوبتی درون این حفرات[۱] با اطراف[۲] متفاوت بوده و درون حفرات غالباً به دلیل فرایند پوسته پوسته شدن[۳] و فروپاشی دانه ای[4] کلاً سست شده و قابلیّت پودر شدن[۵] را یافته که این خود با گذشت زمان باعث توسعه و رشد این حفرات می شود (شکل ۸).



شکل ۸. هوازدگی حفره ای توسعه یافته در گرانیت های روستای ده غیبی – جنوب مشهد

• **فرایند هوازدگی کروی و تورّق سطحی** (ورقه ورقه شدن)[۶]

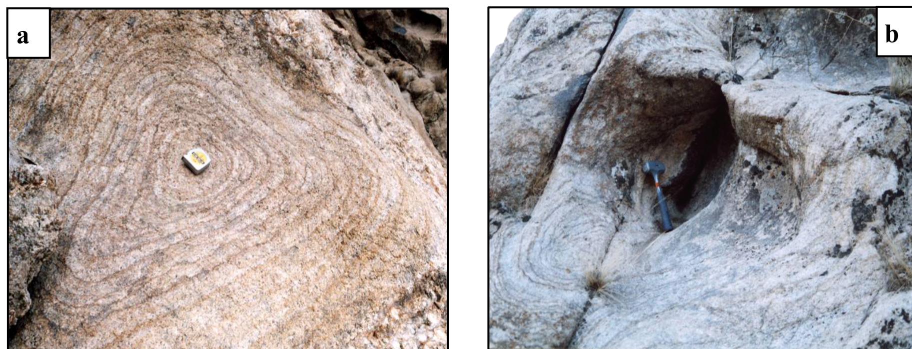
این دو فرایند قابل مقایسه با یکدیگراند. درفرایند هوازدگی کروی که شکلّی از هوازدگی شیمیایی محسوب می شود، پوسته هایی با یک مرکز[۷] ازسنگ متلاشی شده ایجاد می شود که قطرآنها از دوسانتی‌متر تا دو متر در تغییر است و بیشتر در اثر نفوذ آب[۸] در مرز درزه ها و دیگر سطوح ضعف سنگ ایجاد می شوند.

1. microclimate.
2. outside climate.
3. flaking.
4. granular disintegration.
5. friability.
6. spheroid and exfoliation weathering.
7. concentric shells.
8. water penetrating.

هوازدگی کروی شبیه به تورّق سطحی با مقیاس بزرگتر[1] می باشد (Bates & Jackson, 1980). اما فرایند تورّق سطحی در اثر ورقه ورقه شدن متحدالمرکز سنگ ایجاد می شود که در اثر فرایندهای فیزیکی یا شیمیایی ، در اثر فشارهای متفاوت درون سنگ نظیر انبساط کانی ها در اثر هوازدگی حرارتی نزدیک سطح زمین یا براثر برداشته شدن فشار رویه‌ی سنگ[2] در اثر فرسایش ایجاد می شوند. در این حالت دراثر انبساط حرارتی کانی ها[3]، درزه هایی موازی سطح زمین[4] ایجاد می شوند که در امتداد آنها فرسایش رخ می دهد. این درزه های با زاویه کم ، گاهی اوقات حاصل افت فشار ناشی از فرسایش بار روی توده نفوذی هستند (Marre, 1986). به طور کلّی به این پدیده ، ورقه ورقه شدن[5] گفته می شود.

به هر حال فرایند هوازدگی کروی، می تواند سازوکاری برای شروع تشکیل هوازدگی حفره ای در گرانیت‌های جنوب مشهد باشد (شکل ۹a). این فرایند در این ناحیه به دلیل تغییرات درجه حرارت و بیشتر در اثر تناوب یخ زدن و ذوب شدن طیّ روزهای زمستان رخ می دهد. به گونه ای که در امتداد این درزه‌های موازی سطح زمین ، بر اثر هوازدگی شیمیایی کانی هایی مانند میکاها ، اکسیدهای قهوه ای رنگ آهن دیده می شوند. این پدیده پس از تشکیل در اثر تناوب دوره های خشک و مرطوب تشدید شده و پس از مدّتی ، حفرات عمیق تر شده و تافونی ها را ایجاد می کنند (شکل ۹b).

1 . larger-scale exfoliation.
2. confining pressure.
3. expansion.
4. sheet joints.
5 . exfoliation.



شکل ۹.
a: هوازدگی کروی (spheroidal weathering) در گرانیت های جنوب مشهد
b: توسعه‌ی تافونی ها پس از تشکیل هوازدگی کروی در گرانیت‌های جنوب مشهد

• تشکیل تافونی ها در امتداد شکستگی‌ها[1]

درزه های متعددی در گرانیت‌های جنوب مشهد قابل مشاهده است، برخی از آنها در مراحل پایانی انجماد ماگما حاصل شده اند، که با موادّ مذاب تأخیری (دایك های آپلیتی و پگماتیت ها) پر شده انـد. در هر حال، درزه ها نیز در این سنگ‌ها سطوح ضعف محسوب می شوند که در امتداد این سطوح فرسایش رخ داده است. در نتیجه سطح درزه ها نیز شروعی برای تشکیل و تکوین تافونی ها در نظر گرفته می‌شوند.

هوازدگی حفره ای در سازند شمشک واقع در بخش شمالی بینالود

هوازدگی حفره ای در سازند شمشک در محدوده‌ی روستای فریزی با موقعیّت عرض جغرافیای ۲۸/۱ و ۲۹ و ۳۶ شمالی و طول جغرافیایی ۳۰/۴ و ۵۸ و ۵۸ شرقی مشاهده می شود که برای دسترسی به آن ، با طیّ چهل کیلومتر مسیر جاده مشهد –قوچان به تقاطع فرعی روستای فریزی رسیده و سپس با طیّ دوازده کیلومتر در جادّه ی فرعی به روستای فریزی می رسیم (شکل ۱).

1. cracks.

سازند شمشک در این محدوده روی فیلیت های جنوب مشهد و در زیر سازند دلیچای قرار گرفته است. از نظر لیتولوژی ، کاملاً ترکیب هتروژنی داشته و عمدتاً از لایه های ماسه سنگی ، شیل های حاوی زغال و فسیل گیاهی و کنگلومرا تشکیل شده است.

کنگلومراهای این سازند اغلب چند منشایی[1] بوده ، یعنی پبل هایی با ترکیب متفاوت داشته که در سیمان کربناته و هماتیتی پراکنده شده اند. جنس پبلهای آن اغلب کوارتز و خرده سنگ‌های رسوبی و دگرگونی است. ماسه سنگ‌ها اغلب دانه ریز تا خیلی دانه درشت بوده و دارای ساختارهای رسوبی از قبیل طبقه بندی های افقی و مورّب هستند. اجزای اصلی تشکیل دهنده این ماسه سنگ‌ها کوارتز ، خرده سنگ‌های دگرگونی (اسلیت و فیلیت) و رسوبی (شیل و ماسه سنگ دانه ریز) و فلدسپات (میکروکلّین ، اورتوکلاز و پلاژیوکلاز) است. این اجزا همراه با عناصر فرعی دیگر مثل میکاها ، کانی های سنگین و اپک در یک سیمان آهکی –هماتیتی –رسی پراکنده شده اند. تافونی های موجود در این سازند ، در بخش ماسه سنگی و کنگلومرایی به خوبی مشاهده می شوند (شکل ۱۰).



شکل۱۰. تافونی های موجود در ماسه سنگ‌های سازند شمشک –قبل از روستای فریزی

1. polymictic.

فرایندهای مؤثّر در توسعه‌ی تافونی ها در سازند شمشک

۱. انحلال سیمان آهکی

یکی از عوامل مؤثّر در تشکیل هوازدگی حفره ای در این سنگ‌ها ، وجود سیمان آهکـی در آنهاسـت. به طور کلّی انحلال سیمان آهکی در بر گیرنده ذرّات تشکیل دهنـده‌ی آنهـا در اثـر نفـوذ آب‌هـای اسـیدی صورت می گیرد.

در مواقع بارندگی ، مقدار کمی آب اسیدی به درون سنگ نفوذ نموده و مقداری از سـیمان کلـسیتی را حل نموده و از بین می برد و در مواقع خشکسالی ، آب به وسیله‌ی تبخیر به سطح سـنگ کـشانده مـی شـود و در این حالت آهک در سطح خارجی سنگ ، پوسته سـختی را تـشکیل مـی دهـد کـه مـشابه پدیـده[1] در گرانیت هاست. پس از مدّتی ، این سطح سخت که درون آن خالی است. به دلایلی شکسته شـده و قـسمت درونی که سست تربوده[2] در برابر فرسایش قرلر گرفته و حفراتی تشکیل می شوند که به مـرور زمـان ، ابعـاد آنها بزرگتر شده و تافونی ها را تشکیل می دهند.

۲. هوازدگی نمکی[3]

به طور کلّی این هوازدگی به دلیل پیدایش گسیختگی هـای کشـشی بـه خـاطر نهـشته شـدن نمـک در قسمت‌هایی از سطح ماسه سنگ‌هاست. در این حالت بر اثر تبلور نمک ها و آبگیری مجدد آنها و بـه دلیـل انبساط حرارتی بالای آنها ، سنگ دچار فروپاشی می شود.

برای اثبات این پدیده ، نمونه هایی از رگولیت ها و خاک های تـشکیل شـده در حفـرات موجـود پـس از آماده سازی ، توسط XRD آنالیز شده اند.

---

1. case hardening.
2. softenin.
3. salt weathering.

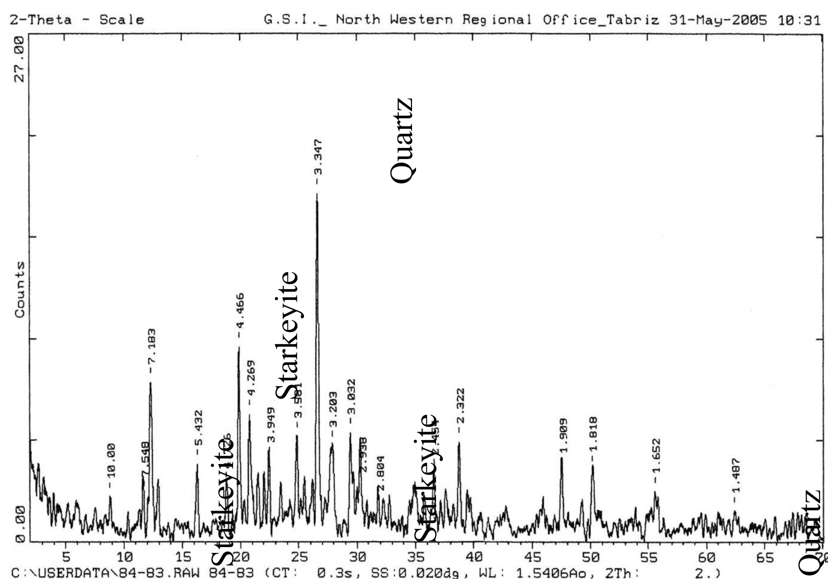
بیشترین کانی موجود در این نمو نه ها که توسط XRD مشخص شده ، کانی استارکیت[1] است که سولفات منیزیم آبدار بوده و کانی کمیابی محسوب می شود (شکل ۱۱). کانی استارکیت به رنگ سفید تا متمایل به زرد دارای سختی ۲ تا ۳ است که برای اولین بار در سال ۱۹۵۶ از معدن استارکی[2] در Madison County ، میسوری ایالات متحده آمریکا گزارش شده است.

این کانی جز کانی های کمیاب[3] بوده و کمتر گزارش شده است. از نظر پیدایش زمین شناسی[4] این کانی ، کانی ثانویه ای است که در زون‌های اکسیدان نهشته های سولفیدی منتج می شوند. این کانی اغلب به صورت شوره زنی پودر مانند[5] در سطح سنگ‌های منطقه مشاهده می شود (شکل ۱۰).

خرده سنگ‌های شیلی موجود در این سنگ‌ها و نیز لایه ها و لامینه های شیلی که بیشتر حاوی پیریت نیز هستند می توانند در اثر هوازدگی ، شوره های نمکی را در سطح سنگ ها ایجاد نمایند. تکوین و توسعه این شوره ها از هوازدگی خرده سنگ‌های ناپایدار طیّ دوره های خشکسالی[6] صورت می گیرد. در هر حال در ماسه سنگ‌های سازند شمشک ، هوازدگی بر اثر رشد نمک ، وزش باد مسلّح به ماسه[7] و تجزیه‌ی شیمیایی باعث پیدایش پوسته نسبتاً سخت[8] و تقریباً ناپایدار در سطح سنگ شده که این عوامل در توسعه تافونی ها، نقش بسیار مهمّی ایفا می کنند.

---

1. starkeyite.
2. starkey.
3 . rare mineral.
4. geological setting.
5. powdery efflorescence's.
6. dry periods.
7 . sandblasting.
8 . duricrust.



شکل ۱۱. گراف XRD خاک های موجود در تافونی های سازند شمشک

نتیجه گیری

تافونی ها در انواع سنگ‌ها رخ می دهند. شرایط متفاوتی، تشکیل و تکوین تافونی هـای جنـوب مـشهد را تحت کنترل خود دارند، که از همه مهمتر خصوصیّات کانی شناسی و سـاختاری سـنگ هـای گرانیتـی ، شرایط آب هوایی محل مزبور و شرایط آب و هوایی درون خود تافونی هاست.

به دلیل این که این سنگ‌ها دارای فابریک گرانولار بوده و از کانی های سیلیکاته دانـه درشـتی تـشکیل شده اند، برخی از کانی ها، مانند فلدسپات‌ها و میکاها ، کانی‌های ناپایـداری بـوده کـه حـساسیّت زیـادی بـه آلتراسیون از خود نشان می دهند، به طوری که به سرسیت و کائولینیـت تبـدیل شـده و ایـن کـانی‌هـا نیـز بـه نوبه‌ی خود نقش مهمّی در فروپاشی سنگ دارند. رطوبت زیاد که از محل‌هـای سیـستم درزه هـای موجـود در این گرانیت‌ها ایجاد می شود، در هنگامی که سنگ‌ها اشباع از رطوبت می شـوند ، تمایـل بـه هـوازدگی شیمیایی بیوتیـت و فلدسـپات را درون سـنگ بـه دنبـال خواهنـد داشـت. درزه هـا[1]، رگـه هـای پگمـاتیتی ،

1. joints.

زینولیت ها[1] نیز در تکوین تافونی مؤثّر هستند. به طور مشخّص پدیده‌ی تورّق سطحی[2] در این گرانیت ها شروعی برای تشکیل تافونی ها محسوب می شوند. در نتیجه در تشکیل این حفرات ، تغییرات آب و هوایی ، ترکیب سنگ ، ساخت و بافت سنگ دارای اهمیت هستند.

اما هوازدگی حفره ای در سازند شمشک واقع در بخش شمالی بینالود بیشتر به دلیل انحلال سیمان آهکی لیتولوژی‌های آن بوده و هوازدگی نمکی نیز نقش بسیار مهمّی در فروپاشی سنگ‌ها و تشکیل این حفرات دارند.

1 . xenoliths.
2 . exfoliation.

منابع و مآخذ

1. Alavi, M., (1991) *Sedimentary and structural characteristics of the Paleotethys remnants in northeastern Iran, Geol*. Soc. Am. Bull., 103, 983-992.
2. Bates, R.L., and Jackson, J., (1980) *Glossary of Geology, American Geological Institute Falls Church*, Virginia, 751p.
3. Blackwelder, E., (1929) *Cavernous rock surface of the desert*, American Journal of Science, 17, 393-399.
4. Campbell, E.M., (1997) *Granite landforms*, Journal of the Royal Society of Western Australia, 80, 101-112.
5. Conca, J.L., and Rossman, G.R., (1985) *Core softening in cavernously weathered tonalite*, Journal of Geology, 93(1), 59-73.
6. Conca, J.L., and Rossman, G.R., (1982) *Case – Hardening of sandstone*, Geology, 10, 520-523.
7. Cooke, R., and Smalley, I.J., (1968) *Salt weathering in desert*, Nature 220, 1226-1227.
8. Cooke, R., Warren, A., and Goudie, A., (1993) *Desert geomorphology*, London, UCL press, 526.
9. Dorn, R.I., Case hardening, in Encyclopedia of Geomorphology, Ed, A.S. Goudie, Routledge: London, 118-119.
10. Dragovish, D., (1969) The origin of cavernous surface (tafoni) in granitic rocks of southern South Australia: Zeitschrift fuer Geomorphologie, 13(2), 163-181.
11. Huang, Z.G., Chen, W.Q., Chen, J.H., (1996) Red Weathered Crust in South China. Chinese Ocean Press, Beijing in Chinese.
12. Li, F.L., (1987) *Distribution characters and grade classification of weathering rocks in the area along the coast of China*. Harbor Reconnaissance 3, 9-14 in Chinese.
13. Marre, J., (1986) *The Structural Analysis of Granitic Rocks*, Elsevier, Amsterdam.
14. Matsukura, Y. and Tanaka, Y., (2000) *Effect of rock hardness and moisture content on tafoni weathering in granite of Mount Doeg-Sung*, Korea, Geografiska Annaler 82A, 59-67.
15. McBride, E.F., and Picard, M.D.,(2000) *Origin and development of tafoni in Tunnel Spring tuff*, Crystal Peak, Utah, USA, Earth surface processes and landforms, 25, 509-518.
16. Mellor, A., Short, J. and Kirkby, S.J., (1997) *Tafoni in the El Chorro area*, Andalucia, Southern Spain, Earth Surface Processes and Landform, 22, 817-833.

17. Mustoe, G.E., (1982) *The origin of honeycomb weathering*, Geological Society of America Bulletin, 93, 108-115.
18. Mustoe, G.E., (1983) *Cavernous weathering in the Capital Reef Desert,* Utah, Earth surface processes and landforms, 8, 517-526.
19. Sequeira Braga, M.A., Paquet, H., and Begonha, A., (2002) *Weathering of granites a temperature climate* (NW Portugal): granitic saprolites and arenization, Catena, 49, 41-56.
20. Smith, B.J., (1978) *The origin and geomorphic implications of cliff foot recesses and tafoni on limestone hamadas in the Northwest Sahara*: Zeitschrift fuer Geomorphologie, 22(1), 21-43.
21. Smith, B., Magee, R.W., and whally, W.B., (1994) *Breakdown patterns of quartz sandstone in a polluted urban environment*, Belfast, Northern Ireland, In: Robinson, D.A., & Williams, R.B.G. (eds) Rock weathering and landform Evolution, Wiley, Chichester, 132-150.
22. Tshang, His-Lin, (1966), *Geomorphological observations on weathering forms in Hong Kong and some other humid regions of Southeast Asia*, Chung Chi Journal,5(2), 206-226.
23. Viles, H.A., (2001) *Scale issues in weathering studies*, Geomorphology, 41, 63-71.
24. Wang, Y.L., (1992) *Micro-study on Bedrock Weathering Crust of Three Gorges and its Classification*. Proceedings of the Fourth Conference of Engineering Geology. Chinese Ocean Press, Beijing in Chinese.

مشخصات نویسندگان:

محمدخانه باد، مربی گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر رضا موسوی حرمی، استاد گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر اسدالله محبوبی، دانشیار گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد